

圆柱体的空间圆锥光反射、折射与衍射

赵建林 杨德兴

(西北工业大学应用物理系, 西安 710072)

(2001 年 11 月 6 日收到; 2001 年 12 月 28 日收到修改稿)

用准直或会聚激光束倾斜照射圆柱体时, 其反射光、透射光(柱体透明时)、衍射光(柱体较细时)的叠加将形成以光束入射点为顶点的空间圆锥形光面(空间光锥), 并且在垂直于柱体轴线方向的观察平面上投影成一圆形光环. 空间光锥的形成与所选圆柱体材料及其粗细无关, 只要其表面具有一定反射能力即可. 空间光锥的锥角等于入射光束主光轴与圆柱体轴线夹角的 2 倍, 与圆柱体和照射光束的直径大小及光波长无关. 给出了对光纤及不同直径大小的玻璃和金属圆柱体的实验观察结果, 并利用矢量图解法对其进行了详细地理论分析. 进而得出, 通常所谓单丝衍射图样, 实际上是细丝的衍射和其表面的反射光场的叠加图样, 对于透明细丝, 还包括其透射光场的贡献. 圆柱体的这种空间圆锥光反射和衍射原理有可能用于光束定位、成形、表面检测以及三维面形测量等.

关键词: 圆柱体, 空间光锥, 投影光环

PACC: 4225F, 4200

1. 引 言

相干光束照射下的细丝衍射及圆柱体的散射现象及其应用始终是一个热点研究课题^[1-8]. 我们在观察细丝的衍射现象时发现, 当用一束准直或会聚激光倾斜照射一圆柱体时, 将形成以光束入射点为顶点的空间圆锥形光面(空间光锥), 并且在垂直于柱体轴线方向的观察平面上投影成一圆形光环. 空间光锥的形成与所选圆柱体材料及其粗细无关, 只要其表面具有一定反射能力即可. 光锥锥角等于入射光束主光轴与圆柱体轴线夹角的 2 倍, 与入射光波长、圆柱体及光束的直径大小无关. 进而, 对各种不同粗细的透明和不透明圆柱体在未扩展及扩展的准直激光束倾斜照射下形成的空间光锥分别进行了实验观察, 均得到类似的结果. 理论分析表明, 这种空间光锥是圆柱体对倾斜入射的相干光束所引起的反射光、折射光及衍射光相互叠加的综合效应. 对于不透明的粗圆柱体, 主要起因于圆柱体表面的反射;

对于透明的粗圆柱体, 主要是表面反射和柱体折射的综合效应; 在细丝情况下, 以衍射效应为主. 本文详细讨论这种圆锥光面的特点、起因及可能的应用前景.

2. 空间光锥的实验观察

2.1. 细激光束照射

如图 1 所示, 由 He-Ne 激光器发出的细激光束倾斜照射在表面光滑的圆柱体 O 上, 设 A 点为主入射点, 圆柱体轴线位于入射面内, 且与入射光束夹角为 θ (即掠射角), 在垂直于圆柱体轴线方向的光屏 P 上直接观察或在光屏后用面阵 CCD 摄像机记录光锥的投影图样.

图 2 为用细激光束倾斜照射光纤丝时, 由 CCD 摄像机在观察屏 P 上拍摄到的空间光锥的投影光环. 其中图 2(a) 为单根光纤丝引起的投影光环, 图 2(b) 和 (c) 为正交叠置的两根光纤丝同时引起的投影光环和直线状投影光带. 这里, 直线状投影光带由与入射光束在竖直面内正交的光纤引起, 投影光环和光带上还能观察到衍射和干涉条纹图样.

图 3 为同样光路条件下拍摄到的不同圆柱体引起的空间光锥的投影光环. 可以看出, 图 3(a) 所示由空心玻璃棒引起的投影光环的强度分布较均匀,

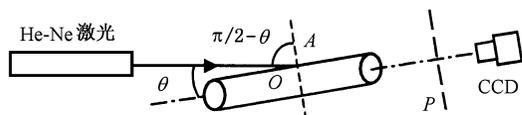


图 1 圆柱体的空间圆锥光反射、折射与衍射实验光路

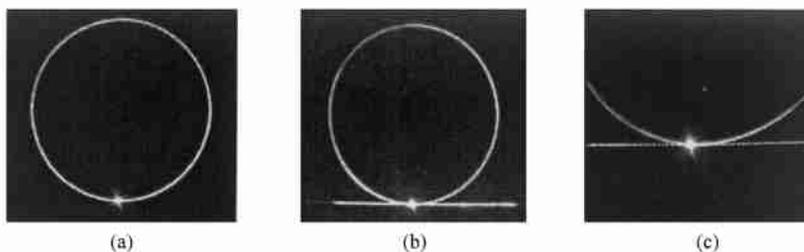


图 2 光纤在细激光束照射下的投影光环 (a)单根光纤; (b)两正交光纤(θ_1 较小, $\theta_2=90^\circ$); (c)两正交光纤(θ_1 较大, $\theta_2=90^\circ$)

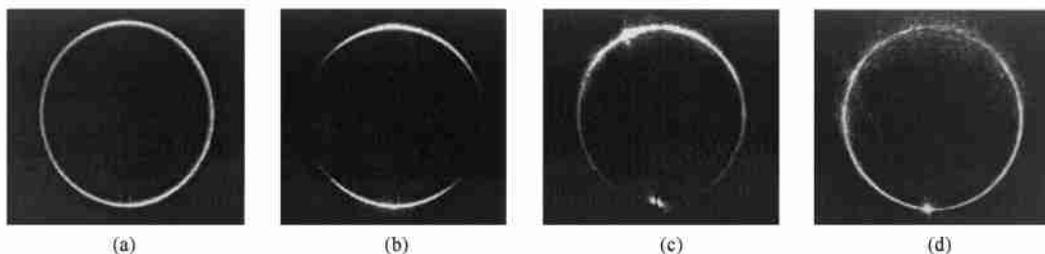


图 3 不同圆柱体在细激光束照射下的投影光环 (a)空心玻璃棒($d_1=1\text{mm}$, $d_2=6.8\text{mm}$); (b)实心玻璃棒($d=3.6\text{mm}$); (c)金属棒($d=3.3\text{mm}$); (d)大头针($d=0.7\text{mm}$)

类似于图 2 所示图样,表明该投影光环主要由空心玻璃棒内直径较小的芯引起.图 3(b)所示投影光环上下断开,光能量主要分布在光束主透射方向(底部)和主反射方向(顶部)附近,表明相应的实心玻璃棒直径大于照射光束直径,因而投影光环主要由玻璃棒的折射和表面反射引起.图 3(c)所示投影光环的光能量主要集中在顶部光束主反射方向附近,表明主要由金属棒顶部附近表面的反射所致.与此不同的是,由细金属棒(大头针)引起的如图 3(d)所示投影光环上的光强度分布则较均匀,显然,不仅仅是表面反射所致.同时,图 3(c)和(d)所示空间光锥的投影光环上部出现弥散的强度分布,也反映了金属棒反射表面存在着机械划痕.

2.2. 扩展的准直激光束照射

将图 1 中的细激光束扩展并准直,使其直径大于被照射的圆柱体(实验中所用光束直径约为 25mm),则在观察屏 P 上得到由不同圆柱体形成的空间光锥的投影光环如图 4 所示.图中可清楚看到光环下部的照射光斑及其因圆柱体遮挡所留下的部分阴影.

2.3. 会聚激光束照射情况

将扩展的准直光束改为会聚光束,则当入射点远离光束会聚点时,仍然得到类似的空间光锥.只是在不同垂轴平面上,光锥的投影光环粗细不同.观察平面越靠近光束会聚点,投影光环越细.观察平面与

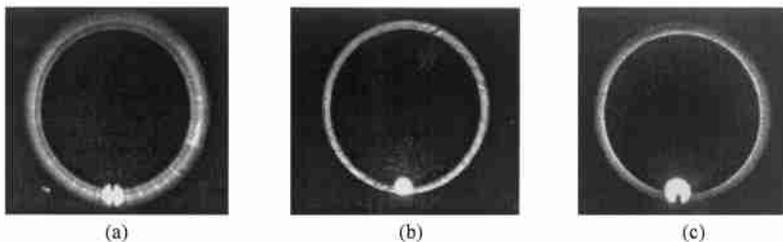


图 4 不同圆柱体在扩展的准直激光束照射下的投影光环 (a)空心玻璃棒($d_1=1\text{mm}$, $d_2=6.8\text{mm}$); (b)实心玻璃棒($d=3.6\text{mm}$); (c)金属棒($d=10\text{mm}$)

光束会聚点重合时, 投影光环最细. 图 5 和图 6 分别为观察平面远离和位于光束会聚点时, 不同圆柱体引起的空间光锥的投影光环. 其中图 5(b) 和图 5(c)

中投影光环的右下方还显示出圆柱体顶部的投影. 图 5(c) 和图 6(c) 中投影光环上部的弥散主要起因于所用金属棒表面沿周向的机械加工划痕的散射.

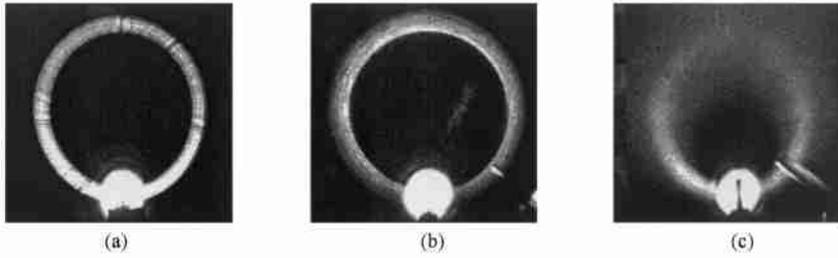


图 5 不同圆柱体在会聚激光束照射下的投影光环(远离会聚点平面上) (a)实心玻璃棒($d = 3.6\text{mm}$); (b)金属棒($d = 3.3\text{mm}$); (c)金属棒($d = 10\text{mm}$)

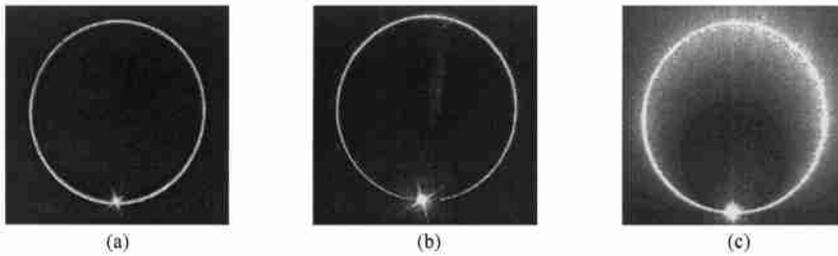


图 6 不同圆柱体在会聚激光束照射下的投影光环(会聚点平面上) (a)实心玻璃棒($d = 3.6\text{mm}$); (b)金属棒($d = 3.3\text{mm}$); (c)金属棒($d = 10\text{mm}$)

3. 空间光锥的特点

由上述实验观察结果可以对圆柱体引起的空间光锥的特点归纳如下:

1) 空间光锥的产生与所用圆柱体材料无关, 即无论用细的光纤、大头针还是粗的玻璃棒、金属棒, 只要其表面具有一定反射能力即可. 圆柱体表面越光滑, 光锥在观察平面上的投影光环越清晰, 否则, 在光束主反射方向, 光束将弥散开.

2) 空间光锥(投影光环)与入射光束(光斑)内切, 过切点的直径方向平行于入射光束主光轴与圆柱体轴线构成的平面. 光锥的顶点为光束主入射点, 锥轴与圆柱体过主入射点的母线重合, 且平行于圆柱体轴线, 锥角等于入射光束主光轴与圆柱体轴线夹角 θ 的 2 倍, 与入射光波长、圆柱体及光束的直径大小无关.

3) 圆柱体较粗时, 投影光环强度呈连续分布状; 较细时, 如光纤、细玻璃棒或大头针, 光环上将同时叠加有干涉、衍射条纹. 入射光束直径越大, 光锥面

的厚度或投影光环的宽度越大. 会聚光束照射时, 光锥面的厚度沿光锥轴线方向逐渐变化. 观察平面远离会聚点时, 投影光环较粗. 在光束会聚点平面上, 投影光环最细.

4) 光束垂直入射时, 空间光锥的锥角等于 π , 圆锥面变成垂直于柱体轴线的圆形平面, 投影光环相应地变为垂直于柱体轴线方向的直线状光带. 对于细丝而言, 此即通常的单丝衍射图样; 对于直径较大的透明或不透明圆柱体而言, 此即入射光束经柱体折射或柱面反射扩展后的光斑.

图 7 为实验观察到的空间光锥的几何结构示意图.

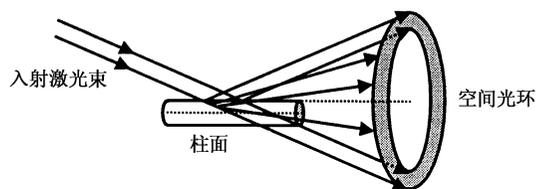


图 7 空间光锥的几何结构

4. 空间光锥的形成机理

原则上讲, 由电磁场理论, 可以给出空间光锥形成机理的严格数学解释^[2-4], 但这种分析过程一般较为复杂. 我们在对光锥图样的特征反复进行实验观察和分析后发现, 利用矢量图解法可以给出物理意义更为直观的解释.

4.1. 衍射的贡献

显然, 对于直径较小的圆柱体, 如光纤、大头针等, 其衍射效应是形成空间光锥的主要因素. 对此可以用矢量图解法加以解释.

首先假设用细准直激光束垂直照射一根不透明细丝. 为简单起见, 这里只考虑衍射情况, 并假定细丝垂直于纸平面放置, 如图 8 所示. 设入射光波矢量为 k_0 , 由于衍射, 光束在垂直于细丝轴线的平面上以入射方向为对称向两侧展开, 各个方向的衍射光波矢量 k_ϕ 大小相等, 且等于入射光波矢量的大小 k_0 , 因而其末端的轨迹位于同一圆周上.

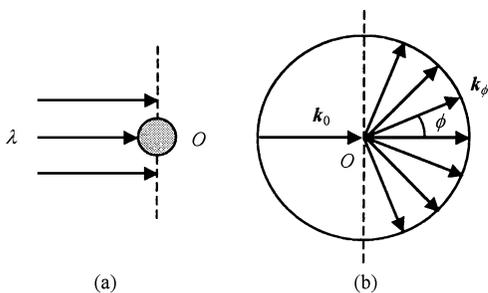


图 8 准直激光束垂直照射细丝时的衍射光波矢量 (a) 照射方式; (b) 衍射光波矢量

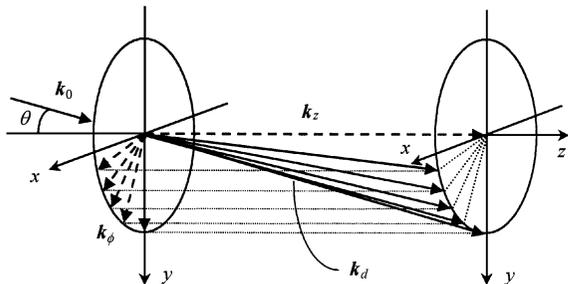


图 9 准直激光束倾斜照射细丝时的衍射光波矢量的分解

其次, 假设光束倾斜照射(掠射)细丝, 细丝轴线与 z 轴重合, 入射光束位于 yz 平面内, 且与 z 轴夹

角即掠射角为 θ , 如图 9 所示. 此时入射光波矢量 k_0 可分解为分别沿 z 轴和 y 轴两个正交分量 k_z 和 k_y , 即

$$k_0 = k_z + k_y, \tag{1}$$

其中

$$k_z = k_0 \cos \theta, k_y = k_0 \sin \theta \tag{2}$$

分别表示两个正交分量的大小.

根据衍射规律, 沿 z 轴方向的入射光波分量 k_z 不发生衍射, 因而方向不变. 沿 y 轴方向的入射光波分量 k_y 则经细丝在 xy 平面内产生衍射, 衍射波矢 k_ϕ 分布与图 8 所示相同, 大小仍为 k_y , 故总衍射波矢量为

$$k_d = k_z + k_\phi. \tag{3}$$

显然, 总的衍射光波矢量 k_d 位于一个以光束入射点为顶点的空间圆锥面上, 圆锥轴线即 z 轴, 锥角等于 2θ .

4.2. 表面反射的贡献

由图 8 和图 9 可看出, 由于光波的最大衍射角 ϕ_{max} 不超过 90° , 故由前向衍射光波最大只能形成半个圆锥面. 这表明实验观察到的由光纤形成空间光锥的投影光环上半部并不是来自细丝衍射的贡献. 并且, 圆柱体较粗时, 衍射效应将不明显. 而实验结果表明, 光锥的形成与圆柱体直径大小无关. 这就是说, 除了衍射效应外, 还存在其他因素. 其次, 光锥的锥角等于自柱面顶点反射光束与圆柱体轴线的夹角, 说明光锥的形成也与柱体表面的反射有关. 显然, 对于不透明圆柱体, 除衍射效应以外, 也只能考虑其表面的反射了. 为讨论问题方便, 这里只考虑光束在圆柱体同一横截面上的反射, 且假定照射光束与圆柱体直径相等, 圆柱体表面光滑.

首先考虑准直光束垂直照射时圆柱体表面的反射情况. 如图 10 所示, 圆柱体的上半柱面对入射光束有反射作用, 相当于一个柱面反射镜. 由于柱面法线沿圆柱体周向连续分布, 因而其表面对入射光束在过入射点的垂轴平面上沿 360° 圆周反射(如图 10 中从 A 点经 A_1 到 A_2 点, 光束自垂直反射逐渐过渡到掠射), 形成圆盘形光面, 其在垂直于入射光束方向的平面上投影为一包含圆柱体几何阴影的直线状光带.

其次考虑光束倾斜照射圆柱体时表面的反射情况. 显然, 光束倾斜照射时, 反射光束相应地作镜像倾斜, 但光束的主入射点不变, 导致圆盘形反射光面

以主入射点为顶点倾斜成一个圆锥形光面. 对此可以从两个方面加以分析.

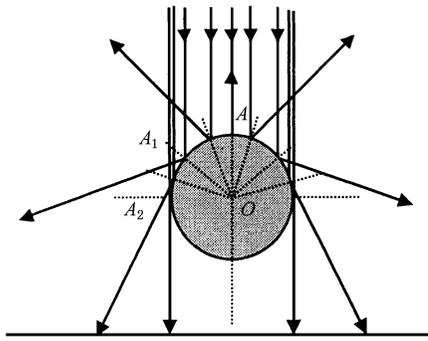


图 10 准直激光束垂直照射时圆柱体表面的反射

圆锥周向旋转 $1/4$ 圆锥时, 其反射光线的方向将旋转半个圆锥. 若照射光束直径远小于圆柱体直径, 则此时由反射引起的光锥将不完整, 主要光能量集中于光束主反射方向的部分圆锥面上.

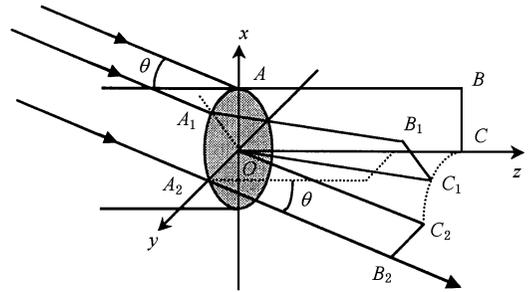


图 12 准直激光束倾斜照射圆柱体时入射面的空间方位

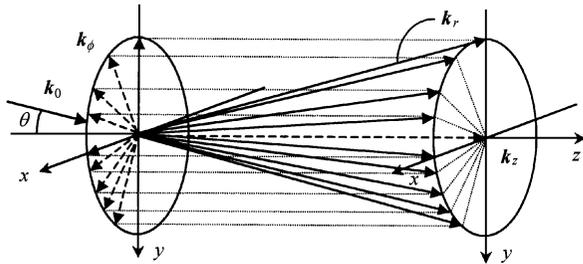


图 11 准直激光束倾斜照射下圆柱体表面反射光波矢量的分解

一方面, 仍然采用上面讨论衍射问题时的矢量图解法. 如图 11 所示, 倾斜入射(掠射)光束的波矢量 k_0 可分解为平行和垂直于圆柱体轴线的两个分量 k_x 和 k_y , 前者沿柱体轴线(z)方向, 后者经柱体表面沿周向反射, 总反射光束波矢量 k_r 等于沿柱体轴线方向的波矢分量 k_x 与周向反射光束波矢分量 k_y 之和, 由于所有周向反射光束波矢分量 k_y 大小相等, 故合成的反射光波矢量 k_r 正好位于以光束入射点为顶点, 以波矢分量 k_x 方向为轴线的圆锥面上, 即

$$k_r = k_x + k_y. \quad (4)$$

另一方面, 可从光束在圆柱体表面沿周向不同点的入射面方位变化来分析. 图 12 给出了沿圆柱体周向不同入射点所对应的光线入射面的空间方位. 如过主入射点 A 的入射面 $ABCO$ 位于 xz 平面, 过掠入射点 A_2 的入射面 $A_2B_2C_2O$ 则垂直于 xz 平面, 且与 yz 平面夹 θ 角. 从 A 经 A_1 到 A_2 , 柱面法线旋转 90° , 相应地入射面法线以 O 点为顶点转过 $1/4$ 圆锥(从 C 经 C_1 到 C_2 在空间构成 $1/4$ 圆). 由反射定律可知, 对于确定的入射方向, 当入射面法线在空间沿

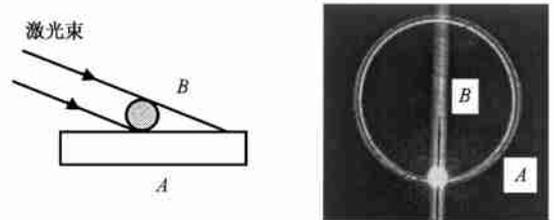


图 13 正交实心玻璃棒($d=3.6\text{mm}$)在扩展的准直激光束照射下所引起的投影光环

4.3. 折射的贡献

当圆柱体透明时, 如玻璃棒、光纤等, 除了表面反射外, 透过柱体的那部分光束经柱体会聚后, 同样会被扩展成圆盘形折射光面(垂直入射时)或圆锥形折射光面(倾斜入射时), 但折射光束最大也只能形成半个圆锥光面. 类似于表面反射情况的讨论, 折射光面的形成可以由圆柱体表面上不同入射点对应的折射面的方位连续变化规律得到证明, 此处不再赘述.

此外, 圆柱体折射及表面反射对空间光锥的贡献也可以由图 13 所示实验结果加以说明. 图中照射光束为扩展的准直激光束, 光束直径为 25mm . A 和 B 是两个直径为 3.6mm 且正交叠置的玻璃棒, 其中 A 棒位于纸平面内且轴线沿水平方向, 因而对应图中的投影光环; B 棒轴线同时垂直于入射光束和纸平面, 因而引起光束沿竖直方向展开, 形成直线投影光带. 投影光环和竖直投影光带中心均有一暗线, 很明显, 分别起因于另一个玻璃棒对入射光束的遮挡.

5. 结 论

以上给出了对细丝及圆柱体的空间圆锥光反射、折射与衍射特性的详细实验观察结果, 以及利用矢量图解法对所得实验结果的理论分析. 由此可以对光束倾斜入射时圆柱体形成的空间光锥得出以下结论:

对于由直径较小的圆柱体, 如光纤、大头针棒等, 在柱体不透明时, 所得空间光锥是单丝衍射和细丝表面反射的综合效应; 透明时, 则是细丝衍射、折射和表面反射的综合效应. 通常所观察到的单丝衍射图样实际上是单丝在相干光束垂直照射下所形成的空间光锥的一种特殊情况——锥角等于 π 时的投

影光带. 对于直径较大的圆柱体, 如直径几毫米或更大的玻璃棒、金属棒等, 不透明时, 所引起的空间光锥主要来自圆柱体表面的反射; 透明时, 则来自圆柱体的折射和表面反射的综合效应. 在圆柱体的垂轴平面上, 空间光锥的投影为一圆形光环. 投影光环的粗细与入射光束的粗细及准直度有关. 细准直光束引起的投影光环较细, 扩展的准直光束引起的投影光环较粗. 由会聚光束形成的投影光环的粗细随投影平面位置不同而变化, 在过光束会聚点的垂轴平面上, 投影光环最细.

根据细光束经圆柱体形成的空间光锥可以确定柱体相对于照射光束的空间方位, 或应用于光束成形, 如获得圆锥面光束或投影光环等, 也可以用于表面检测或三维面形测量.

[1] Glass M 1996 *Appl. Opt.* **35** 1605

[2] Kozaki S 1982 *J. Opt. Soc. Am. A* **72** 1470

[3] Sail J M, Valle P J, Gonzolez F, Ortiz E M and Moreno F 1996 *Opt. Lett.* **21** 1330

[4] Lock J A 1997 *J. Opt. Soc. Am. A* **14** 640

[5] Bewsher A, Powell L and Boland W 1996 *Appl. Opt.* **35** 1654

[6] Powell L 1987 *Appl. Opt.* **26** 3705

[7] Bewsher A and Boland W 1994 *Appl. Opt.* **33** 7367

[8] Kuittinen M, Vahimaa P, Honkanen M and Tununen J 1997 *Appl. Opt.* **36** 3034

Spatial light-cone induced by a cylinder

Zhao Jian-Lin Yang De-Xing

(Department of Applied Physics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(Received 6 November 2001; revised manuscript received 28 December 2001)

Abstract

It is found that the interference of reflected, refracted and diffracted light beams from an inclined cylinder illuminated by a collimated or convergent laser beam will form a spatial light-cone with a conic node at the incident point of the laser beam. On the plane normal to the cylinder axis, the projection of the light cone becomes a circle light-ring, the formation of which is independent of the material and the diameter of selected cylinder, so long as its surface has certain reflectivity. The experimental measurement and phenomenological analysis show that the coning angle of the spatial light-cone is double of the angle between the incident beam and the cylinder axis, and independent of wavelength and the diameter of the cylinder and the incident beam. In this paper we present the experimental observations by using light-fiber, glass and metal bar with various diameters. The origin of the spatial light-cone can be simply explained with wave-vector analysis. As a conclusion, the diffraction pattern induced by a thin bar is in practice a synthesizing result of the diffraction and surface reflection. For transparent cylinders, the refraction of the bar is also an important factor. The principle of the spatial light-cone formation may be used in beam orientation, configuration, and surface testing.

Keywords: cylinder, spatial light-cone, projected light-ring

PACC: 4225F, 4200